

На правах рукописи



003069632

Меньшиков Борис Николаевич

**НЕЛИНЕЙНАЯ ЭХОКОМПЕНСАЦИЯ НА БАЗЕ  
АДАПТИВНЫХ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ  
ФИЛЬТРОВ ВОЛЬТЕРРА**

Специальность 05 12 13  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Мен.*

Владимир - 2007

Работа выполнена на кафедре динамики электронных систем  
Ярославского государственного университета им П.Г. Демидова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Брюханов Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Бернюков Арнольд Константинович  
доктор технических наук  
Джиган Виктор Иванович

Ведущая организация: ОАО «Ярославский радиозавод»

Защита диссертации состоится 25 мая 2007 г. в 14.00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском  
государственном университете по адресу: 600000, г Владимир, ул  
Горького, д 87, корп 1, ауд 211

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ.  
Автореферат разослан «19» апреля 2007 г

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интенсивный переход к цифровому представлению сигналов в телекоммуникационных сетях способствует улучшению качества связи по многим основным параметрам, однако ввиду возрастающих задержек и пониженному уровню шума в цифровых цепях делает более заметным такой мешающий разговору эффект, как эхосигналы

Для уменьшения влияния эхосигнала на разговор абонентов применяют эхозаградители и эхокомпенсаторы. Применение эхозаградителей позволяет достичь значительного подавления эхосигнала вне зависимости от линейности эхотракта, но ограничено заметностью их работы для абонентов. Поэтому в современных системах связи применяют эхокомпенсаторы. Работа эхокомпенсатора основывается на формировании оценки эхосигнала и вычитании ее из прошедшего эхосигнала, при этом их функционирование является практически незаметным для абонентов. Построение эхокомпенсаторов ведется с применением теории адаптивной обработки сигналов, что обусловлено динамикой характеристик эхотрактов. Большой вклад в развитие данного направления внесли Н. Винер, Р. Калман, Б. Уидроу, С. Стирнз, Д. Гловер, К. Ф. Н. Коуэн, П. М. Грант, В. Г. Репин, Г. Г. Тартаковский, В. Н. Фомин, В. В. Шахгильдян и др.

Кроме свойств сходимости и уровня остаточного эхосигнала существует еще один важный фактор, определяющий реализацию адаптивных алгоритмов эхокомпенсации – потребление вычислительных ресурсов или вычислительная сложность. На практике этот фактор делает невозможной реализацию сложных алгоритмов эхокомпенсации ввиду резкого возрастания стоимости конечного решения или невозможности работы алгоритма в режиме реального времени.

Решение проблемы эхокомпенсации в классе линейных адаптивных фильтров в составе соответствующих эхокомпенсаторов в ряде случаев не позволяет получить требуемый уровень подавления эхосигнала даже при наличии так называемого нелинейного процессора, осуществляющего нелинейную обработку остаточного эхосигнала и являющегося упрощенным функциональным аналогом эхозаградителя. Данный факт обусловлен нелинейными искажениями в эхотракте, возникающими из-за наличия аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований речевого сигнала, дифференциальных систем телефонных аппаратов, и др. Уровень возникающих при этом нелинейных составляющих искаженного эхосигнала часто превышает пороговое значение нелинейного процессора, что приводит к пропуску эхосигнала. Поэтому нелинейный процессор не может считаться универсальным решением для обработки нелинейных составляющих эхосигналов.

Известен ряд работ группы авторов (В. Келлерман, А. Штенгер, Ф. Куч, Л. Траутман и Р. Рабенштейн), посвященных нелинейным методам

компенсации экосигналов на основе рядов Вольтерра второго порядка. Приведенные при этом результаты получены при определенных допущениях. В частности, использовались ряды Вольтерра не выше второго порядка и не учитывались задержки сигнала в экотракте при использовании безынерционных элементов в модели нелинейного экотракта. Использование адаптивных фильтров на основе рядов Вольтерра обусловлено возможностью более точного описания нелинейных радиотехнических и телекоммуникационных систем, так как фильтры Вольтерра характеризуются полиномиальными ядрами, являющимися импульсными откликами различной размерности. Среди работ отечественных авторов необходимо отметить работы Кунегина С В , Цыбулина М К , Иванова В И , посвященные исследованиям различных методов подавления экосигналов, работы Ланнэ А А и Соловьевой Е Б , посвященные синтезу фильтров на основе рядов Вольтерра. Проблемой подавления экосигналов занимались и занимаются специалисты ряда отраслевых институтов - НИИР (Зачесов Н И , Зинин И П и др ), ЛОНИИС (Вемян Г В , и др ), ЦНИИС (Жарков М А и др ). Следует отметить, что в данных работах не рассмотрена возможность использования нелинейных эхокомпенсаторов на основе адаптивных квадратичных или кубических фильтров Вольтерра.

Несмотря на наличие большого количества работ в данной области, эффективность существующих линейных и нелинейных эхокомпенсаторов далека от максимальной, а задача разработки компенсационных методов подавления нелинейных составляющих экосигналов, включая кубические, является актуальной и перспективной.

**Предметом исследования** являются характеристики работы нелинейных цифровых электрических и акустических эхокомпенсаторов. Экотракт представляется нелинейной моделью с помощью кубического цифрового фильтра Вольтерра.

**Цель** диссертационной работы состоит в разработке и исследовании эхокомпенсатора на базе кубического фильтра Вольтерра с динамически меняющейся структурой и пониженной вычислительной сложностью, и адаптивного алгоритма для перестройки весовых коэффициентов фильтра, основанного на нормализованном методе наименьших квадратов (НМНК).

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ ранее предложенных методов понижения вычислительной сложности нелинейного эхокомпенсатора на базе полиномиального фильтра Вольтерра.

2. Осуществить разработку и анализ динамической модификации кубического фильтра Вольтерра с уменьшенной вычислительной сложностью, которая позволила бы обрабатывать кубические нелинейные составляющие экосигналов. Провести сравнение вычислительной сложности новой модификации и существующих решений.

3 Синтезировать адаптивный алгоритм перестройки коэффициентов полиномиальных ядер фильтра Вольтерра, основанный на нормализованном методе наименьших квадратов

4 Провести тестирование нелинейного эхокомпенсатора, построенного на базе модифицированного кубического фильтра Вольтерра и использовании нового алгоритма, на тестах рекомендаций Международного Союза Электросвязи

**Методы исследования** основаны на положениях теории сигналов и систем дискретного времени, теории адаптивных систем, теории функциональных рядов Вольтерра и математическом аппарате линейной алгебры

**Научная новизна работы:**

1 Предложена динамическая модификация кубического фильтра Вольтерра, позволяющая уменьшить вычислительную сложность нелинейного эхокомпенсатора на базе данного фильтра по сравнению со стандартной структурой фильтра Вольтерра, при использовании алгоритма НМНК

2 Проведено на моделях исследование нелинейных электрических и акустических эхокомпенсаторов, позволившее предложить новые критерии оценок эффективности их работы

3 Исследовано изменение уровня остаточного эхосигнала в зависимости от длин полиномиальных ядер фильтра Вольтерра и характеристик эхотракта

4 Проведен анализ работы предложенного нелинейного эхокомпенсатора с использованием алгоритма НМНК. Выполнено тестирование предлагаемой модификации на тестах рекомендаций МСЭ-Т G 165 и G 167

**Внедрение:**

- 1 Результаты научной работы автора использованы в разработках ОАО «СеверТрансКом» (г Ярославль)
2. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре динамики электронных систем физического факультета Ярославского государственного университета имени П Г Демидова (специальность 200900 - Сети связи и системы коммутации), а также внедрены в научно-исследовательские работы при выполнении исследований в рамках грантов РФФИ № 02-02-17500 «Нелинейная динамика цифровых электронных систем» (2002-2004 гг.), № 06-02-17195 «Нелинейные явления в динамических системах дискретного времени» (2006-2008 гг.) и № 06-08-00782 «Развитие теории цифровой обработки сигналов и изображений в технических системах» (2006-2008 гг.)

### **На защиту выносятся:**

1. Адаптивный полиномиальный фильтр Вольтерра с динамически перестраиваемой структурой полиномиальных ядер на основе алгоритма НМНК Разработанная модификация алгоритма НМНК для перестройки весовых коэффициентов фильтра позволяет сократить вычислительные затраты в диапазоне от 5,2 % до 26,1% (в зависимости от длин полиномиальных ядер) по сравнению со стандартной структурой фильтра Вольтерра в составе нелинейного эхокомпенсатора
2. Результаты исследований предложенной динамической модификации полиномиальных фильтров Вольтерра при работе с тестовыми и реальными речевыми сигналами Использование новой динамически перестраиваемой структуры кубического фильтра Вольтерра позволяет улучшить подавление нелинейных составляющих эхосигналов на 17-22 дБ по сравнению с линейными эхокомпенсаторами при 16-битной точности представления Применение квадратичных фильтров Вольтерра при тех же условиях улучшает подавление нелинейных составляющих эхосигналов не более чем на 9-11 дБ
3. Результаты анализа моделей нелинейных эхокомпенсаторов, перестраиваемых согласно нормализованного алгоритма наименьших квадратов, в режиме встречного разговора

### **Практическая ценность работы:**

1. Предложена динамически перестраиваемая структура полиномиального фильтра Вольтерра в составе нелинейных эхокомпенсаторов, позволяющая значительно снизить вычислительные затраты по сравнению со стандартной структурой фильтра Вольтерра в составе эхокомпенсатора Это позволит либо использовать более дешевые сигнальные процессоры, либо обрабатывать эхотракты большей длины
2. Использование предложенной модификации не требует значительных изменений в уже существующие коды адаптивных алгоритмов Параметры разработанного алгоритма позволяют настраивать нелинейный эхокомпенсатор для работы в конкретных условиях эксплуатации
3. Исследовано поведение модели нелинейного эхокомпенсатора, основанного на новой модификации, на реальном речевом сигнале
4. Исследовано влияние уровня и характера нелинейных искажений в эхотракте на основные характеристики работы нелинейного эхокомпенсатора в условиях нелинейных эхотрактов
5. Исследовано поведение модели нелинейного эхокомпенсатора, основанного на новой модификации, в режиме встречного разговора

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 7-й и 8-й Международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2005, 2006), V Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2004), 61-й научной сессии, посвященной Дню радио (Москва, 2006), научно-технической конференции "Радиолокация, навигация и связь (RLNC-2006)" (Воронеж, 2006), 12-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2006), а также на ярославских областных конференциях молодых ученых и аспирантов

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 4 статьи (1 статья в ведущем рецензируемом журнале, входящем в перечень журналов ВАК) и 13 публикаций в трудах и материалах конференций

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 129 наименований, и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 116 страниц машинописного текста. Работа содержит 59 рисунков и 23 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

**В первом разделе** рассмотрены существующие модификации полиномиальных фильтров Вольтерра в составе нелинейных эхокомпенсаторов, указаны их достоинства и недостатки. Также рассмотрены основные виды нелинейных искажений, возникающих в телекоммуникационных системах, включая телефонные сети общего пользования, и методы их компенсации.

Для уменьшения негативного влияния электрических эхосигналов применяют эхокомпенсаторы, устанавливаемые в четырехпроводной части цепи. В задачи эхокомпенсатора входит формирование искусственной копии эха и вычитание ее из прошедшего в приемный канал эхосигнала. Общая схема расположения эхокомпенсатора в телефонной сети приведена на рис. 1.

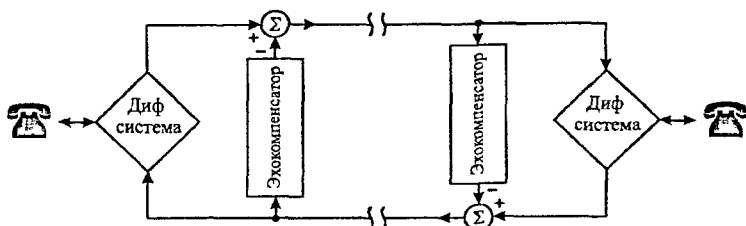


Рис 1 Схема расположения эхокомпенсатора в телефонной сети

Так как нелинейность даже обычного телефонного канала может достигать 10% и более (определяется коэффициентом нелинейных искажений, выраженным в процентах), то на выходе линейной системы эхокомпенсации следует ожидать неподавленных нелинейных составляющих эхосигнала с уровнями порядка 20 дБ ниже уровня исходного речевого сигнала. При этом их субъективное мешающее воздействие может превышать даже мешающее воздействие обычного эхосигнала. Кроме того, в ряде случаев, как показывают экспериментальные данные измерений реальных эхотрактов, третья гармоника тестовой частоты в 1020 Гц оказывается более мощной, чем вторая. Данный факт свидетельствует о необходимости учета не только квадратичных, но и кубических нелинейных искажений эхосигналов. В реальных условиях нелинейность эхотракта может достигать значительно больших величин, особенно в точке отражения от телефонного аппарата. Данный фактор ограничивает эффективность использования линейных систем эхокомпенсации.

Также обосновано использование кубических фильтров Вольтерра в составе нелинейного эхокомпенсатора и сформулированы краткие выводы. Таким образом, возникает необходимость использования нелинейных адаптивных систем эхокомпенсации, позволяющих обрабатывать нелинейные эхотракты. Компенсация нелинейных искажений осуществляется путем применения нелинейных адаптивных фильтров в составе эхокомпенсаторов.

**Во втором разделе** рассмотрен синтез нелинейного эхокомпенсатора на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра с динамически перестраиваемой структурой. Получены результаты сравнения вычислительной сложности предлагаемой модификации и эхокомпенсатора на основе кубического фильтра Вольтерра со стандартным представлением полиномиальных ядер. Проведены исследования влияния коэффициентов полиномиальных ядер на суммарный вклад нелинейных составляющих эхосигналов для разработанного эхокомпенсатора.

Так как речь человека является квазистационарным случайным процессом, то в структуре ядер можно выделить области, дающие



основной вклад в энергию каждой нелинейной составляющей выходного процесса, и отключить те области, вклад которых незначителен и находится на уровне шума канала. Этот шум состоит из теплового шума и шума, обусловленного передачей сигналов по проводам витых пар, расположенных в одном кабеле с витой парой, по которой осуществляется связь с рассматриваемым ближним абонентом. Обычно этот шум ограничен по уровню и имеет известное распределение плотности в полосе используемых частот. Типичное значение уровня шума равно -30 дБ и выше относительно среднего уровня эхосигналов. Такой шум предполагается стационарным и практически не влияет на скорость процесса адаптации, но при этом он ограничивает значения параметра ERLE. Данный параметр представляет собой отношение энергий подавленного и остаточного эхосигналов

$$\text{ERLE}(k) = 10 \lg \left[ \frac{E\{(y(k))^2\}}{E\{e(k)^2\}} \right] \quad (1)$$

Линейный эхокомпенсатор на базе адаптивного трансверсального фильтра перестраивает свою структуру с целью минимизации среднего квадрата ошибки, поэтому в условиях нелинейного эхотракта его работа сводится к своего рода линейной аппроксимации эхотракта. Значения параметра ERLE в этом случае могут быть получены из выражения

$$\text{ERLE}_1(k) = 10 \lg \left[ \frac{E\{(y(k))^2\}}{E\{e_1(k)^2\}} \right], \quad (2)$$

где  $e_1(k)$  - остаточный эхосигнал на выходе линейного эхокомпенсатора в условиях нелинейного эхотракта. Для полиномиального адаптивного фильтра получаем

$$\text{ERLE}_2(k) = 10 \lg \left[ \frac{E\{(y(k))^2\}}{E\{e_2(k)^2\}} \right], \quad (3)$$

где  $e_2(k)$  - остаточный эхосигнал на выходе нелинейного эхокомпенсатора в условиях нелинейного эхотракта.

Оценка выходной последовательности адаптивного эхокомпенсатора на базе неоднородного кубического фильтра Вольтерра с триангулярным представлением ядер, позволяющего учитывать нелинейности третьей степени инерционного и безынерционного характера, определяется выражением

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) &= \hat{y}_1(k) + \hat{y}_2(k) + \hat{y}_3(k) = \\ &= \sum_{m_1=0}^{N_1-1} \hat{h}_1(m_1)x(k-m_1) + \sum_{m_1=0}^{N_2-1} \sum_{m_2=m_1}^{N_2-1} \hat{h}_{2, \text{tr}}(m_1, m_2)x(k-m_1)x(k-m_2) + \\ &+ \sum_{m_1=0}^{N_3-1} \sum_{m_2=m_1}^{N_3-1} \sum_{m_3=m_2}^{N_3-1} \hat{h}_{3, \text{tr}}(m_1, m_2, m_3)x(k-m_1)x(k-m_2)x(k-m_3), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $x(k)$  - входная последовательность отсчетов,  $\hat{h}_1(m_1)$  - подстраиваемое линейное ядро полиномиального фильтра,  $\hat{h}_{2,r}(m_1, m_2)$  и  $\hat{h}_{3,r}(m_1, m_2, m_3)$  - подстраиваемые квадратичное и кубическое ядра в триангулярном представлении,  $N_1, N_2, N_3$  - соответствующие порядки указанных ядер. При использовании адаптивных кубических фильтров Вольтерра необходимо принять во внимание тот факт, что для кубического ядра и речевого сигнала справедливо выражение

$$E\{x(k-l)x(k-m)x(k-p)\} = 0, \quad \forall l, m, p \quad (5)$$

В итоге исходная триангулярная структура кубического ядра может быть преобразована к одномерному представлению следующим образом

$$\hat{h}_{3,r}(m_1, m_2, m_3) \rightarrow \hat{h}_{3,m}(m), \quad (6)$$

при этом для порядка такого ядра практически всегда выполняется условие  $N_3 < N_2$ . Соответственно изменяется представление оценки выходной последовательности

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) = \hat{y}_1(k) + \hat{y}_2(k) + \hat{y}_3(k) = & \sum_{m_1=0}^{N_1-1} \hat{h}_1(m_1)x(k-m_1) + \\ & + \sum_{m_1=0}^{N_2-1} \sum_{m_2=m_1}^{N_2-1} \hat{h}_{2,r}(m_1, m_2)x(k-m_1)x(k-m_2) + \sum_{m=0}^{N_1-1} \hat{h}_{3,m}(m)x^3(k-m) \end{aligned} \quad (7)$$

При этом также должно быть выполнено условие

$$E\left\{\prod_{i=1}^p x(k-m_{p,i}) \prod_{j=1}^q x(k-m_{q,j})\right\} \neq 0, \quad (p+q)_{\bmod 2} = 0 \quad (8)$$

Однако анализ разработанных статистических модификации и аппроксимаций адаптивных квадратичных фильтров Вольтерра в составе нелинейных эхокомпенсаторов, а также экспериментальные данные позволяют сделать заключение о необходимости учета недиагональных коэффициентов квадратной матрицы, представляющей квадратичное ядро. Вместе с тем необходимо отметить, что значения весовых коэффициентов, стоящих не на главной диагонали, быстро уменьшаются практически до нулевых значений при удалении от нее, т.е. при увеличении разности  $(m_2 - m_1)$  (см. выражение (4)). Это означает, что и вклад от этих коэффициентов в нелинейную составляющую сигнала  $\hat{y}(k)$  также быстро уменьшается. Если этот вклад будет составлять величину, меньшую некоторого порогового значения, которое может быть определено, например, на основе данных об уровне аддитивного шума в эхотракте, то вся недиагональная область коэффициентов квадратичного ядра может быть в этом случае отключена. Это приведет к диагональному представлению квадратичного ядра и уменьшению вычислительной нагрузки на эхокомпенсатор. Такое отключение может быть проведено только после завершения процесса сходимости адаптивного алгоритма, когда вклад

нелинейных компонентов в сигнал  $\hat{y}(k)$  от недиагональных коэффициентов и коэффициентов главной диагонали можно будет оценить. Порог отключения может быть выбран и на основе данных об уровне мощности нелинейных составляющих. В данной работе предлагается выбрать пороговое значение величиной -30 дБ по мощности в отношении к мощности линейной составляющей на выходе эхокомпенсатора  $\hat{y}_1(k)$ , хотя данное пороговое значение в случае необходимости может быть заменено другим. При этом пороговый контроль предлагается осуществлять не по значениям отсчетов в один и тот же момент времени  $k$ , а усреднять эти значения на интервале стационарности речевых сигналов, равном в среднем 30 мс, что при частоте дискретизации в 8 кГц соответствует  $T_k = 240$  отсчетов. Также следует заметить, что вклад от диагональных коэффициентов перед отключением остальной части квадратичного ядра должен превосходить пороговое значение. Таким образом, отключение области недиагональных коэффициентов произойдет при выполнении условий

$$\left( \frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^{T_k} (\hat{y}_{2,md-s}(i))^2 \right) / \left( \frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^{T_k} (\hat{y}_1(i))^2 \right) < P, \quad (9)$$

$$\left( \frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^{T_k} (\hat{y}_{2,1D}(i))^2 \right) / \left( \frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^{T_k} (\hat{y}_1(i))^2 \right) > P, \quad (10)$$

где  $\hat{y}_{2,md-s}(i)$  - вклад от недиагональных коэффициентов (последовательность отсчетов),  $\hat{y}_{2,1D}(i)$  - вклад от диагональных коэффициентов (последовательность отсчетов), т.е. от коэффициентов квадратичного ядра в одномерном представлении. При выборе порогового значения величиной -30 дБ по отношению к мощности сигнала  $\hat{y}_1(k)$  значение параметра  $P = 0.001$ .

Если вклад кубического ядра по мощности составляет величину менее -30 дБ ниже уровня мощности линейной составляющей на выходе  $\hat{y}_1(k)$ , то оно также отключается, т.к. его коэффициенты будут в этом случае неправдоподобны из-за наличия аддитивного шума в эхотракте, что дополнительно уменьшает суммарную вычислительную сложность работы нелинейного эхокомпенсатора. Отключение кубического ядра произойдет при выполнении условия

$$\left( \frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^{T_k} (\hat{y}_{3,1D}(i))^2 \right) / \left( \frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^{T_k} (\hat{y}_1(i))^2 \right) < P, \quad (11)$$

где  $\hat{y}_{3,1D}(i)$  - вклад от коэффициентов кубического ядра в одномерном представлении. Отключение кубического ядра и недиагональных коэффициентов квадратичного ядра может быть осуществлено одновременно. Если уровень нелинейных составляющих возрастает, отключенные области ядер вновь включаются в работу, так как через каждые 4000 отсчетов (0.5 с) предлагается осуществлять пороговый

контроль. Необходимо отметить, что первая проверка должна быть проведена в установившемся режиме, по крайней мере, для линейного ядра. При моделировании такая проверка выполнялась для  $k \in \{2000, 4000, 8000\}$  при статическом характере нелинейности. В зависимости от динамики нелинейностей реального эхотракта интервал может быть изменен. Значения недиагональных весовых коэффициентов квадратичного ядра и весовых коэффициентов кубического ядра в установившемся режиме между проверками не меняются в случае проведения отключения.

Для исследования используется модель нелинейного эхокомпенсатора, общая структурная схема которого показана на рис. 2.

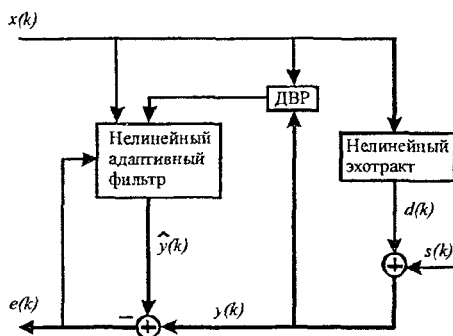


Рис. 2. Общая структурная схема эхокомпенсатора на базе нелинейного адаптивного фильтра.

Приняты следующие обозначения:  $x(k)$  - сигнал дальнего абонента, входная последовательность,  $d(k)$  - сигнал на выходе модели нелинейного эхотракта,  $s(k)$  - сигнал ближнего абонента, включающий аддитивный шум  $n(k)$ ,  $y(k)$  - выходная последовательность, сумма сигналов на выходе нелинейного эхотракта и ближнего абонента,  $\hat{y}(k)$  - оценка выходной последовательности эхокомпенсатора,  $e(k)$  - сигнал ошибки, ДВР - детектор встречного разговора, работающий согласно алгоритму Гейгеля. В модели нелинейного эхотракта учитывается инерционность нелинейных искажений.

На рис. 3 приведена структурная схема разработанного нелинейного эхокомпенсатора на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерры с динамически меняющейся структурой полиномиальных ядер. Для ядер адаптивного кубического фильтра Вольтерры в составе указанного нелинейного эхокомпенсатора использованы следующие обозначения:  $\hat{h}_1$  - линейное ядро,  $\hat{h}_{2,md}$  - область недиагональных коэффициентов

квадратичного ядра,  $\hat{h}_{2,1D}$  - область квадратичного ядра, содержащая диагональные коэффициенты,  $\hat{h}_3$  - кубическое ядро. Пунктирной линией выделены отключаемые участки.

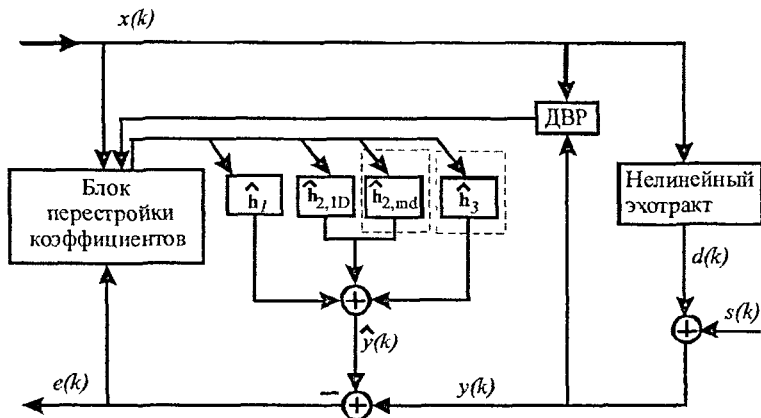


Рис 3 Структурная схема нелинейного эхокомпенсатора на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра с динамически меняющейся структурой полиномиальных ядер

Далее рассмотрен алгоритм НМНК, согласно которому осуществляется перестройка всех весовых коэффициентов адаптивного фильтра Вольтерра. Выходной сигнал  $y(k)$  определяется выражением

$$y(k) = d_1(k) + d_2(k) + d_3(k) + s(k) = \sum_{m_1=0}^{L_1-1} h_1(m_1)x(k-m_1) + \\ + \sum_{m_1=0}^{L_2-1} \sum_{m_2=m_1}^{L_2-1} h_2(m_1, m_2)x(k-m_1)x(k-m_2) + \sum_{m=0}^{L_3-1} h_{3,m}(m)x^3(k-m) + s(k) \quad (12)$$

Здесь  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  - порядки линейного, квадратичного и кубического ядер модели нелинейного эхотракта соответственно. В выражении (14) кубическое ядро представлено в одномерном виде. Оценка выходной последовательности нелинейного эхокомпенсатора на основе кубического фильтра Вольтерра с динамически перестраиваемой структурой определяется выражением

$$\hat{y}(k) = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} \hat{h}_1(m_1)x(k-m_1) + \\ + \sum_{m_1=0}^{N_2-1} \sum_{m_2=m_1}^{N_2-1} \hat{h}_2(m_1, m_2)x(k-m_1)x(k-m_2) + \sum_{m=0}^{N_3-1} \hat{h}_{3,m}(m)x^3(k-m) \quad (13)$$

Установлено, что при выполнении условий  $L_1 \leq N_1$ ,  $L_2 \leq N_2$ ,  $L_3 \leq N_3$  значения параметра ERLE, обеспечиваемые нелинейным эхокомпенсатором в условиях нелинейной модели эхотракта, достигают максимальных значений и ограничиваются уровнем аддитивного шума. При  $L_i > N_i$ ,  $i=1, 2, 3$  уровень общего сигнала ошибки возрастает из-за увеличения уровня сигнала, возникающего в результате расстройки коэффициентов. Также приведено описание усовершенствованного алгоритма НМНК и указаны условия динамической перестройки структуры адаптивного фильтра.

В табл. 1 приведены полученные формулы для расчета вычислительной сложности на один отсчет выходной последовательности для неоднородного модифицированного кубического фильтра Вольтерра.

Таблица 1 Расчет вычислительной сложности нелинейного эхокомпенсатора

Вид ядра	Модифицированный неоднородный кубический фильтр с перестраиваемой структурой	Неоднородный кубический фильтр с треугольным представлением ядер
Линейное	$2 (N_1 + 1)$	$2 (N_1 + 1)$
Квадратичное	от $3 (N_2 + 1)$ до $\frac{3}{2} (N_2^2 + N_2) + 2$	$\frac{3}{2} (N_2^2 + N_2) + 2$
Кубическое	от 0 до $4 (N_3 + 1)$	$\frac{2}{3} (N_3 + 1) (N_3 + 2) (N_3 + 3) + 3$
Общая вычислительная сложность	от $2 (N_1 + 1) + 3 (N_2 + 1)$ до $2 (N_1 + 1) + \frac{3}{2} (N_2^2 + N_2) + 2 + 4 (N_3 + 1)$	$2 (N_1 + 1) + \frac{3}{2} (N_2^2 + N_2) + \frac{2}{3} (N_3 + 1) (N_3 + 2) (N_3 + 3) + 5$

Для сравнения указаны соответствующие данные для стандартной структуры неоднородного кубического фильтра Вольтерра при учете симметрии ядер, т.е. при их треугольном представлении. Предлагаемая модификация полиномиальных ядер позволяет значительно снизить вычислительные затраты. Результаты моделирования в среде Matlab показывают, что сокращение вычислительных затрат составляет величину от 5,2 % до 26,1% в зависимости от порядков полиномиальных ядер по сравнению со стандартной структурой фильтра Вольтерра. Для иллюстрации данного утверждения на рис. 4 приведены значения вычислительной сложности (в миллионах операций в секунду) для предлагаемого нелинейного эхокомпенсатора (НЭК) при  $N_1 = 256$ ,  $N_2 = 10$ ,  $N_3 = 5$ .

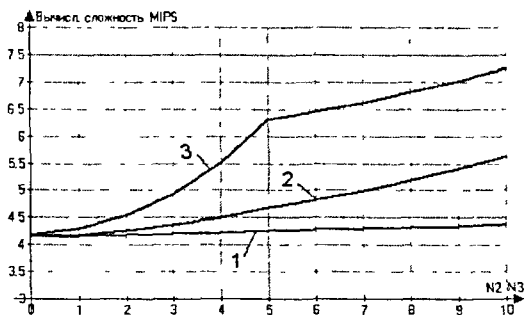


Рис 4 Вычислительная сложность НЭК при  $N_1 = 256$

- 1 - минимальная для предлагаемого эхокомпенсатора,
- 2 - максимальная для предлагаемого эхокомпенсатора,
- 3 - для НЭК на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерры со стандартным представлением полиномиальных ядер

Блок-схема функционирования нелинейного эхокомпенсатора на основе адаптивного кубического фильтра Вольтерры с динамически перестраиваемой структурой может быть представлена на рис 5

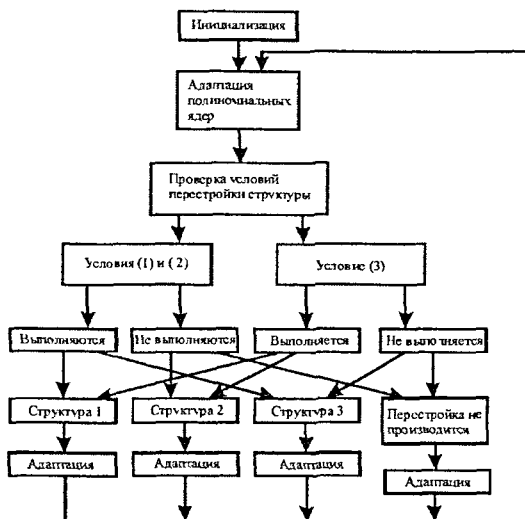


Рис 5 Блок-схема функционирования предлагаемого нелинейного эхокомпенсатора

После инициализации адаптивного алгоритма в течение 0.5 с. происходит подстройка весовых коэффициентов квадратичного ядра в триангулярном представлении и кубического ядра в одномерном. После этого производится первая проверка условий (1-3) перестройки структуры фильтра Вольтерра. Условия (1) и (2) определяют перестройку структуры квадратичного ядра, условие (3) – отключение кубического ядра. Далее в зависимости от результата данной проверки структура нелинейного адаптивного фильтра преобразуется к одному из следующих видов или преобразование не проводится. Структура 1 – кубическое ядро отключается, квадратичное ядро переходит к диагональному представлению после отключения недиагональных коэффициентов. Структура 2 – отключается кубическое ядро, квадратичное ядро остается в триангулярном представлении. Структура 3 соответствует диагональному представлению квадратичного и кубического ядер. После отключения весовых коэффициентов процесс адаптации продолжается до выполнения следующей проверки.

При моделировании рассмотрены 4 модели нелинейных электрических и акустических эхотрактов с инерционными и безынерционными нелинейными искажениями. Все модели представлены неоднородными фильтрами Вольтерра.

На рис. 6 приведены уровни сигналов в нелинейной системе эхокомпенсации для одной из моделей нелинейного электрического эхотракта и тестового сигнала с уровнем -10 дБм0 при отношении сигнал/шум 50 дБ. В модели эхотракта присутствуют безынерционные нелинейные искажения. Эхотракт вносит ослабление в эхосигнал, равное 6.9 дБ.

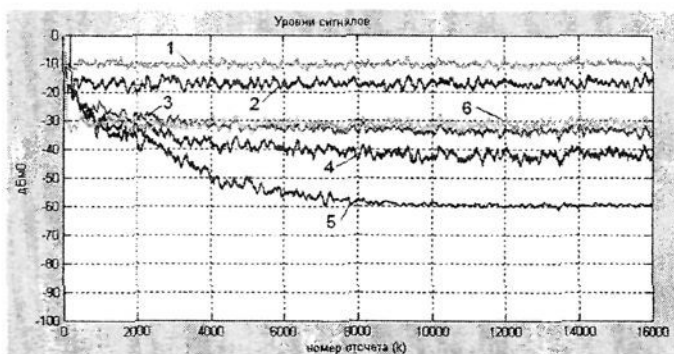


Рис. 6. Уровни сигнала дальнего абонента (1), эхосигнала (2), остаточного эхосигнала для линейного эхокомпенсатора в условиях нелинейного эхотракта (3), нелинейного эхокомпенсатора на базе квадратичного фильтра Вольтерра (4), нелинейного эхокомпенсатора на базе кубического фильтра Вольтерра (5) и нелинейных составляющих эхосигнала (6)



Уровень суммарной мощности нелинейных составляющих при этих условиях равен -31,6 дБм0, или примерно 3,4% от мощности выходного сигнала. Линейный эхокомпенсатор при данной модели нелинейного эхотракта не позволяет выполнить требования рекомендации МСЭ-T G 165. Нелинейный эхокомпенсатор на основе кубического фильтра Вольтерра позволяет выполнить указанные требования и для других уровней входных сигналов, и видов нелинейностей эхотракта.

Для входного сигнала с уровнем -10 дБм0 и рассматриваемой модели нелинейного эхотракта установлено, что линейный эхокомпенсатор не способен обеспечить выполнение требования рекомендации G 165, касающегося уровня остаточного эхосигнала, если мощность нелинейных составляющих превышает 2,1% от мощности сигнала на выходе нелинейного эхотракта. Данная величина соответствует коэффициенту нелинейных искажений, равному 6,3%, который в телефонных сетях часто превышает данную величину. Также установлено, что при данном уровне входного сигнала нелинейный эхокомпенсатор на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра обеспечивает выполнение требования рекомендации G 165, касающегося уровня остаточного эхосигнала, при уровне нелинейных составляющих до -18 дБм0. Для тестовых сигналов с уровнями -20 дБм0 и -30 дБм0 линейный эхокомпенсатор не обеспечивает выполнение требований G 165, если мощность нелинейных составляющих превышает соответственно -40 дБм0 и -43 дБм0 в указанной модели, в то время как нелинейный эхокомпенсатор выполняет необходимое подавление нелинейных составляющих.

Детектор встречного разговора работает согласно алгоритму Гейгеля, базирующемуся на неравенстве

$$|y(k)| \geq \theta * \max\{|x(k)|, |x(k-1)|, \dots, |x(k-N_1+1)|\}, \quad (14)$$

где параметр  $\theta$  выбирается в зависимости от предполагаемой величины ослабления эхосигнала в нелинейном эхотракте по сравнению с сигналом дальнего абонента. Установлено, что в случае нелинейного эхотракта выбор порогового значения  $\theta$  в данном случае не может полностью исключить запаздывание срабатывания ДВР при появлении сигнала ближнего абонента и тем самым предотвратить отклонение коэффициентов адаптивного фильтра Вольтерра от оптимальных значений.

Разработанный нелинейный эхокомпенсатор удовлетворяет требованиям рекомендации МСЭ-T G 165, касающимся уровня остаточного эхосигнала, степени его подавления и скорости обнаружения и обработки ситуации встречного разговора.

**В третьем разделе** проводится оценка эффективности использования предлагаемого эхокомпенсатора для решения задач нелинейной электрической эхокомпенсации в телефонных сетях. Используются тестовый, формируемый согласно рекомендации G 165, и реальный речевой сигналы с 16-битной точностью представления. Для проверки эффективности нелинейного эхокомпенсатора использованы

модели нелинейных электрических эхотрактов – с инерционными и безынерционными нелинейными искажениями. Проводится сравнение с линейным эхокомпенсатором в условиях нелинейного эхотракта. Исследуется влияние аддитивного шума в модели эхотракта на основные характеристики разработанного эхокомпенсатора при тестовых речевых сигналах и различных отношениях сигнал/шум. Также выполняется проверка режимов работы предлагаемого эхокомпенсатора на отдельных тестах рекомендации МСЭ-Т G 165.

Тест № 1 определяет максимальный уровень подавления эхосигнала эхокомпенсатором. Согласно требованиям теста коэффициенты адаптивного фильтра должны инициализироваться нулевыми значениями. Результаты теста приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты теста № 1 рекомендации МСЭ-Т G 165 для нелинейного электрического эхокомпенсатора.

Уровни тестового сигнала, дБм0	Требования рекомендации G 165, дБм0	Линейный эхокомпенсатор	Нелинейный эхокомпенсатор	
		e1, дБм0	e2, дБм0	e3, дБм0
-10	-36	-33	-42	-60
-20	-42	-40	-50	-60
-30	-48	-45	-55	-60

В таблице использованы обозначения e1 – уровень остаточного эхосигнала на выходе линейного эхокомпенсатора в условиях нелинейного эхотракта, e2 – на выходе нелинейного эхокомпенсатора на базе адаптивного квадратичного фильтра Вольтерра, e3 – на выходе нелинейного эхокомпенсатора на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра. Используется алгоритм НМНК. Для сравнения указаны уровни выходного сигнала при использовании линейного адаптивного фильтра с длиной импульсной характеристики (ИХ), равной длине линейного ядра полиномиального фильтра, в условиях нелинейного эхотракта. Длина линейной составляющей модели нелинейного эхотракта составляет 128 отсчетов. Из таблицы видно, что нелинейный электрический эхокомпенсатор, в отличие от линейного, в условиях нелинейного эхотракта позволяет выполнить требования рекомендации G 165.

Тест № 2 определяет скорость сходимости используемого адаптивного алгоритма в зависимости от параметров адаптивного алгоритма. Согласно требованиям теста совместное подавление сигнала дальнего абонента эхотрактом и эхокомпенсатором должно быть не менее 27 дБ. Данный уровень должен быть достигнут за 500 мс. Уровень сигнала  $x(k)$  выбирается из диапазона [-10 . -30] дБм0. В тесте длина линейного ядра составляла 128 отсчетов. Полученные для тестового сигнала с

уровнем -10 дБм0 результаты приведены в табл 3 Модель № 1 – эхотракт с безынерционными нелинейными искажениями, модель № 2 – с инерционными нелинейными искажениями Суммарный уровень нелинейных составляющих эхосигналов составляет -21,9 дБм0 и -21,6 дБм0 соответственно. Таким образом, рассмотрен случай, когда с задачей нелинейной электрической эхокомпенсации не справляется и нелинейный эхокомпенсатор на основе адаптивного квадратичного фильтра Вольтерра Для тестового сигнала с уровнем -20 дБм0 требования G 165 выполняются при  $\alpha_1 \in [0,32 \text{ } 1]$ ,  $\alpha_2 \in [0,37 \text{ } 1]$ ,  $\alpha_3 \in [0,39 \text{ } 1]$ , для тестового сигнала с уровнем -30 дБм0 – при  $\alpha_1 \in [0,39 \text{ } 1]$ ,  $\alpha_2 \in [0,44 \text{ } 1]$ ,  $\alpha_3 \in [0,48 \text{ } 1]$

В табл 3 использованы обозначения ЛЭК – линейный эхокомпенсатор в условиях нелинейного эхотракта, НЭК-1 – нелинейный эхокомпенсатор на базе адаптивного квадратичного фильтра Вольтерра, НЭК-2 - нелинейный эхокомпенсатор на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра

Таблица 3 Результаты теста № 2 рекомендации G 165, задача нелинейной электрической эхокомпенсации

Вид модели эхотракта и уровень тестового сигнала		Минимальное значение коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$		
		ЛЭК	НЭК-1	НЭК-2
Модель № 1	-10 дБм0	Не выполняется	Не выполняется	$\alpha_1 = 0,21$ $\alpha_2 = 0,29$ $\alpha_3 = 0,32$
Модель № 2	-10 дБм0	Не выполняется	Не выполняется	$\alpha_1 = 0,21$ $\alpha_2 = 0,30$ $\alpha_3 = 0,34$

Нелинейный эхокомпенсатор в условиях нелинейного электрического эхотракта с инерционными и безынерционными искажениями позволяет выполнить требования рекомендации Нелинейный адаптивный фильтр способен обрабатывать нелинейные составляющие эхосигналов, даже если их уровень достигает величины в -20 дБ и выше по отношению к исходному речевому сигналу дальнего абонента

Также установлено, что выполнение требований тестов № 3а и № 3б осуществляется при  $\alpha_1 \leq 0,67$ ,  $\alpha_2 \leq 0,71$ ,  $\alpha_3 \leq 0,73$  для обеих моделей нелинейных электрических эхотрактов Разработанный нелинейный эхокомпенсатор также позволяет выполнить требования теста № 5 рекомендации G.165 (тест на обрыв эхотракта)

В четвертом разделе проводится оценка эффективности использования предлагаемого эхокомпенсатора для решения задач

нелинейной акустической эхокомпенсации в телефонных сетях. Указаны особенности акустических эхотрактов. На рис. 7 приведены значения параметра ERLE для тестового речевого сигнала (рис. 8) со средним уровнем  $-10$  дБм0 при использовании нелинейного эхокомпенсатора в условиях нелинейного акустического эхотракта с безынерционными нелинейными искажениями при отношении сигнал/шум, равном 40 дБ.

Проводится сравнение с линейным эхокомпенсатором в условиях нелинейного эхотракта. Исследуется влияние аддитивного шума в модели эхотракта на основные характеристики разработанного эхокомпенсатора при тестовых речевых сигналах и различных отношениях сигнал/шум. Также выполняется проверка режимов работы предлагаемого эхокомпенсатора на отдельных тестах рекомендации МСЭ-T G.167.

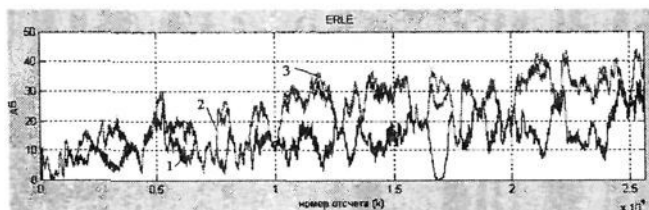


Рис. 7. Значения параметра ERLE для тестового речевого сигнала с уровнем  $-10$  дБм0 в условиях нелинейного акустического эхотракта: 1 - линейный эхокомпенсатор, 2 - нелинейный эхокомпенсатор на базе квадратичного фильтра Вольтерра, 3 - нелинейный эхокомпенсатор на базе кубического фильтра Вольтерра

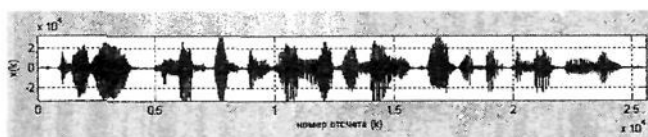


Рис. 8. Тестовый речевой сигнал

Нелинейный эхокомпенсатор в условиях нелинейного акустического эхотракта с инерционными и безынерционными нелинейными искажениями также позволяет выполнить требования рекомендации G.167, согласно которым совместное подавление эхосигнала эхотрактом и акустическим эхокомпенсатором должно быть не менее 20 дБ для всех уровней входного сигнала. Данный уровень должен быть достигнут за 1 с (тест № 5.4.10). Полученные результаты приведены в табл. 4. Обозначения здесь тождественны обозначениям, принятым в табл. 3. Уровень входного сигнала составляет  $-10$  дБм0. Уровни мощности нелинейных составляющих для двух рассматриваемых моделей равны  $-20.8$  дБм0 и  $-20.9$  дБм0.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать выводы о перспективности использования нелинейных акустических эхокомпенсаторов на базе кубического фильтра Вольтерра в условиях нелинейных акустических эхотрактов с различным уровнем и характером возникающих в них нелинейных искажений

Таблица 4 Результаты теста № 5 4 10 рекомендации G 167, задача нелинейной акустической эхокомпенсации

Вид модели эхотракта и уровень тестового сигнала		Минимальное значение коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$		
		ЛЭК	НЭК-1	НЭК-2
Модель № 1	-10 дБм0	Не выполняется	Не выполняется	$\alpha_1 = 0.56$ $\alpha_2 = 0.59$ $\alpha_3 = 0.64$
Модель № 2	-10 дБм0	Не выполняется	Не выполняется	$\alpha_1 = 0.57$ $\alpha_2 = 0.61$ $\alpha_3 = 0.65$

При тестировании рассмотрен случай, когда с задачей нелинейной акустической эхокомпенсации не справляется и нелинейный эхокомпенсатор на основе адаптивного квадратичного фильтра Вольтерра. При тестировании детектора встречного разговора в составе нелинейного акустического эхокомпенсатора (тест № 5 4.11) на основе адаптивного кубического фильтра Вольтерра с динамически перестраиваемой структурой определены следующие максимальные параметры  $\alpha_1 \leq 0.74$ ,  $\alpha_2 \leq 0.78$ ,  $\alpha_3 \leq 0.81$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существующие нелинейные эхокомпенсаторы на основе адаптивных квадратичных фильтров Вольтерра способны улучшить подавление нелинейных составляющих эхосигналов только на 9-11 дБ по сравнению с линейными эхокомпенсаторами. Несмотря на то, что в целях снижения вычислительной сложности разработаны модификации и аппроксимации полиномиальных ядер, их использование для построения эхокомпенсатора на основе кубического фильтра Вольтерра затруднительно.

2. Разработана динамическая модификация структуры адаптивного кубического фильтра Вольтерра в составе соответствующего эхокомпенсатора, позволяющая уменьшить вычислительную сложность его реализации на 5 2-26 1% в зависимости от порядков полиномиальных ядер по сравнению со стандартной структурой адаптивного кубического фильтра Вольтерра. Полученное уменьшение при аппаратной реализации нелинейного эхокомпенсатора позволит либо использовать более дешевые

аппаратные средства, либо осуществлять обработку более длинных эхотрактов

3. Применение нелинейных адаптивных фильтров Вольтерра в составе нелинейных электрических и акустических эхокомпенсаторов в условиях нелинейных эхотрактов позволяет получить лучшее по сравнению с эхокомпенсаторами на основе линейных адаптивных фильтров и квадратичных фильтров Вольтерра подавление эхосигнала, достигающее 17-22 дБ и 8-11 дБ соответственно

4 Выполнено тестирование разработанного нелинейного эхокомпенсатора на тестах рекомендаций МСЭ-Т G 165 и G 167 Проведена проверка работы предложенного эхокомпенсатора на речевых сигналах с различными уровнями мощности Нелинейный адаптивный фильтр в составе нелинейного эхокомпенсатора способен осуществлять подавление нелинейных составляющих эхосигналов, даже если их уровень достигает величины -18 дБм0

5 Разработанная модификация может быть использована при модернизации существующих и построении новых эхокомпенсаторов, а также применена для решения задач нелинейной акустической и электрической эхокомпенсации как в IP-телефонии, так и в беспроводной телефонии

В Приложении 1 приведен список используемых сокращений и обозначений.

В Приложении 2 дано математическое описание нерекурсивных цифровых полиномиальных фильтров, к которым относятся фильтры Вольтерра

Приложение 3 содержит акты внедрения результатов диссертационной работы

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1 Меньшиков Б Н, Приоров А Л Нелинейная эхокомпенсация на базе адаптивного полиномиального фильтра Вольтерра с динамически перестраиваемой структурой // Цифровая обработка сигналов 2006 № 3 С 20-25

2 Меньшиков Б Н, Приоров А Л Эффективный адаптивный алгоритм для цифровых кубических фильтров Вольтерра // Матер. науч -техн семинара «Синхронизация, формирование и обработка сигналов» Ярославль, 2003 С. 91-95

3 Меньшиков Б Н, Приоров А Л Адаптивный кубический фильтр Вольтерра // Сб науч труд. Всерос науч конф, посвященной 200-летию Ярославского государственного университета им П Г Демидова Ярославль, 2003 С. 111-115

4 Меньшиков Б Н Нелинейная электрическая эхокомпенсация на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра // Сб матер V Всерос науч -

техн конф «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» Чебоксары, 2004 С 197-199

5. Меньшиков Б.Н. Адаптивный неоднородный кубический фильтр Вольтерра в задаче нелинейной электрической эхокомпенсации в телефонии // Сб. матер V науч-практ конф студентов, аспирантов и молодых ученых «Ярославский край. наше общество в третьем тысячелетии» Ярославль, 2004 С 85-86

6. Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л. Нелинейная электрическая эхокомпенсация на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра // Сб матер VI междунар конф и выст «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2004 Т.1, С 126-129 (рус, англ).

7. Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л. Нелинейная эхокомпенсация на базе адаптивного кубического фильтра Вольтерра // Сб тр студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы физики» Ярославль, 2005 С 208-216

8. Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л., Тараканов А.Н., Коврижных А.Г. Нелинейная эхокомпенсация на базе модифицированного неоднородного кубического фильтра Вольтерра // Сб матер. VII междунар конф «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2005 Т 1, С 160-164 (рус, англ)

9. Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л., Коврижных А.Г. Модификация неоднородного адаптивного кубического фильтра Вольтерра в задачах нелинейной эхокомпенсации // Сб. матер междунар. науч-техн конф «Информационные средства и технологии» Москва, 2005 С 131-135.

10. Меньшиков Б.Н. Нелинейная эхокомпенсация на базе кубического фильтра Вольтерра с динамически перестраиваемой структурой // Сб матер VIII междунар конф и выст «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2006 Т 1, С 236-240 (рус, англ)

11. Коврижных А.Г., Меньшиков Б.Н. Модификация кубического фильтра Вольтерра в задачах нелинейной эхокомпенсации // Тез докл XII междунар. науч-техн конф студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» Москва, 2006 С 170-171

12. Коврижных А.Г., Меньшиков Б.Н. Прямая идентификация нелинейных эхотрактов на основе полиномиального фильтра Вольтерра // Сб. матер VIII междунар конф и выст «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2006 Т 1, С 216-219 (рус, англ)

13. Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л. Нелинейный электрический эхокомпенсатор на базе кубического фильтра Вольтерра с безынерционными полиномиальными ядрами // Тр 61-й науч сессии, посвященной Дню радио Москва, 2006 С 91-93.

14. Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л. Нелинейная эхокомпенсация на базе адаптивного полиномиального фильтра Вольтерра с перестраиваемой структурой // Тр междунар науч-техн конф «Информационные средства и технологии», Москва, 2006 Т 3, С 41-45

18

15 Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л. Нелинейная эхокомпенсация на базе адаптивного полиномиального фильтра Вольтерры с динамически перестраиваемой структурой // Сб. матер. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация и связь (RLNC-2006)». Воронеж, 2006. Т. 1, С. 199-211.

16 Меньшиков Б.Н., Приоров А.Л. Нелинейная эхокомпенсация на основе адаптивного кубического фильтра Вольтерры в телефонных сетях // Сб. докл. науч.-техн. конф. «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях». Москва, 2006. Ч. 1. С. 266-277.

17 Меньшиков Б.Н., Тараканов А.Н. Нелинейная эхокомпенсация на основе адаптивного фильтра Вольтерры с перестраиваемой структурой // Физический вестник ЯрГУ. Ярославль, 2006. Вып. № 1. С. 234-242.

Подписано в печать 17.04.07  
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе  
Ярославский государственный университет  
150000 Ярославль, ул. Советская, 14